

# 人工衛星の観測を取り入れた天文学習のための 人工衛星の明るさの観測と光度予測

本田和靖・東條文治・川上紳一

岐阜大学・教育学部・理科教育講座(地学)

## Observation and prediction of the magnitudes of artificial satellites for the astronomical studies

Kazuyasu Honda, Bunji Tojo, and Shin-ichi Kawakami

*Faculty of Education, Gifu University, Gifu, 501-1193, Japan*

### 要旨

岐阜大学教育学部理科教育講座(地学)が運用しているwebサイト「人工衛星観測ナビゲータ」に掲載されている明るい人工衛星の明るさの観測を行い、光度(等級)を予測する関係式を求めた。観測を行った人工衛星は、国際宇宙ステーション(ISS)、ハッブル宇宙望遠鏡(HST)、上層大気観測衛星(ユアーズ)、熱帯降雨観測衛星(TRMM)、海洋観測衛星(SEASAT)、測地実験衛星あじさい(AJISAI)の6つである。人工衛星は球形をしていると仮定すると、明るさは位相関数と観測者と人工衛星までの距離の関数となり、位相関数と人工衛星までの距離がわかっている地点での明るさのデータがあれば光度が求められる。双眼鏡を用いて星座の中を移動する人工衛星の観測を行って、背景にある星の明るさと比較して光度を推定した。これまで、「人工衛星観測ナビゲータ」のホームページでは、飛行経路と時刻についての予測が掲載されていたが、明るさ(等級)に関する情報を追加することで、観測者が人工衛星を見つけやすくなるものと期待される。

キーワード: 天体, 星座, 人工衛星, 光度, 等級, 予測, インターネット

keywords: astronomical object, constellation, artificial satellites, magnitude, prediction, the internet

### 1. はじめに

天体の観測は小中学校の理科教育の学習における重要な柱のひとつである。観測や実験などを用いた授業については、目的意識をもった観察、実験を行うことにより、科学的に調べる能力や態度を育てるとともに、科学的な見方や考え方を養うことができるようにすることが重要な点である。

目的意識をもった天体観測には、まれにやってくる明るい彗星や日食、月食などが有効であるが、こうした天体現象はめったに起こらない。しかし、人工衛星は多数あり毎晩観察者の頭上を通過しているので、それらを見つけるという

活動が天体観察学習の動機づけになるという提案がある(川上ほか, 2003a)。人工衛星を見つけることが課題として掲げられると観察者は、人工衛星を見つけるという確かな目的意識を持って星座の観察に臨む。また、見逃さないために飛行経路付近の目印となる星の位置や星座などを調べることで、星に対する認識が高まる。さらに、方位や高度といった空間認識や正確な時刻に対しての意識が高まる。そして、なによりも観測に成功したときに得られる感動がある(川上, 2003)。人工衛星の観測には、このような点で学習効果があると考えられる。

現在、数多くの人工衛星が地球を回っている。いまや人工衛星は、GPSや天気予報など私たち

の生活の中で欠かせない存在になっている。それらの中には星空の中で明るく輝いて肉眼で見つけることができるくらいの光度になるものがある。岐阜大学教育学部理科教育講座（地学）では、(有) 夢・チャレンジャーとの産学連携プロジェクトとして、(有) スカイ・エスエッチの協力を得て「人工衛星観測ナビゲータ」という人工衛星の軌道経路や到来時間を予測したwebサイトを運用してきた。

人工衛星の到来時刻や方位の予測については、(独) 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) やドイツ航空宇宙局 (Heavens-Above) などがwebサイトを運用している。JAXAのホームページでは、国際宇宙ステーションのほか、日本が打ち上げた人工衛星の情報を掲載しているが、天体観測愛好家向けのページであり、小中学生を対象とした天体学習向けではない。Heavens-Aboveは英語版のみであり、横浜市少年科学館などがこのページから情報を入手してホームページで情報を紹介しているが、こちらも天体観測愛好家向けのページである。「人工衛星観測ナビゲータ」は、小中学校の天体学習や生涯学習における星座や天体観察のためのweb教材として、全天表示画面における任意の地点をクリックすると地表座標系で星座と人工衛星の飛行経路が表示されるなど、天体観測の初心者にもわかりやすい表示で情報を提供するように工夫してある。また、掲載している人工衛星は主に科学衛星や地球観測衛星で、科学への興味や関心を高めるようなものを選んでおり、国際宇宙ステーションの活動を紹介するCGや、国際宇宙ステーションから見た地球の3Dシミュレーションソフト「地球観測ナビゲータ」などの関連教材も開発し、「人工衛星観測ナビゲータ」と合わせて公開している点にも特色がある。

これまでの人工衛星の観測の経験からすると、人工衛星は明るいものでは-2等級程度にまで達するものもあるが、暗いものについては4~5等級程度の肉眼では観測が困難なものもある(川上ほか, 2003b)。したがって、もし明るさの情報があれば人工衛星の正しい方位を観測しても発見できないことがあり、天体観測学習における達成感が得られないという問題点があっ

た(東條・川上, 2006)。また、同じ人工衛星であっても軌道などによって明るさは異なるため、人工衛星の観測には観測条件に応じたきめの細かい明るさの情報が重要となる。そこで、人工衛星の明るさを予測するための研究を行った。

## 2. 人工衛星の光度予測の理論

### 2.1 球形の人工衛星の明るさを決める要素

天体の光度には、恒星のように自ら発する光によって明るさが決まるものと、月や惑星のように太陽が発する光を反射することによって明るさが決まるものがある。人工衛星は後者の反射天体である。人工衛星のような反射天体の明るさは、形状の複雑さや表面物質の反射率の不均質性などによる影響があるが、ここでは人工衛星が均質で理想的な球体であると仮定し、明るさの予測をおこなう。

人工衛星を均質で理想的な球体であると仮定すると、明るさは人工衛星を經由した観測者から太陽までの距離、人工衛星の見かけの大きさ、人工衛星の反射率、人工衛星の光る部分の割合、という4つの要素によって決まる(例えば、荒木・荒木, 1956; Veverka, 1979)。まず、人工衛星を經由した観測者から太陽(光源)までの距離について考える。これは観測者から人工衛星までの距離と人工衛星から太陽までの距離の和である。明るさは光源までの距離の二乗に反比例するが、太陽までの距離(約1億5000万km)は非常に大きいので、観測者から人工衛星までの距離は数100~数1000kmのオーダーであるため、太陽までの距離のわずかな変化は誤差として扱える。すなわち、人工衛星を經由した観測者から太陽までの距離は常に一定と考えることができ、この要素は無視できる。

次に、人工衛星の見かけの大きさについて考える。見かけの大きさは、観測者から人工衛星までの距離によって変化し、その二乗に反比例する。つまり、人工衛星の実際の大きさを人工衛星までの距離の二乗で割ったものになる。そして、明るさは見かけの大きさに比例する。また、表面素材の反射率であるが、これは人工衛星ごとに異なると考えられるものの均質と仮定

すると姿勢などによる影響はなく、常に一定の値と考えることができる。

最後の人工衛星の光る部分の割合であるが、これは人工衛星の位置と関係している。太陽と人工衛星及び観測者の位置関係について考えたとき、三者の位置関係によって人工衛星の光る部分の割合が変化する(図1)。このとき、人工衛星から見た太陽と観測者がなす角のことを位相角といい、光る部分の割合は位相角の関数(位相関数)として表すことができる。明るさは光る部分の面積に比例するため、光る部分の割合を示す位相関数に比例する。以下に位相関数についてさらに詳しい説明をする。

## 2.2 位相角と位相関数

月のような球形の反射天体では、光る部分の割合は位相角 $\phi$ によって変化する(図1)。ここで位相角 $\phi$ は、人工衛星から見た太陽と観測者がなす角である。まず、満月の場合を考えると、位相角 $\phi$ は $0^\circ$ で位相関数は1となる。次に、満月の時の半分が光っている半月の場合を考えると、位相角 $\phi$ は $90^\circ$ で位相関数は $1/2$ となる。

さて、任意の位相角の場合については、位相

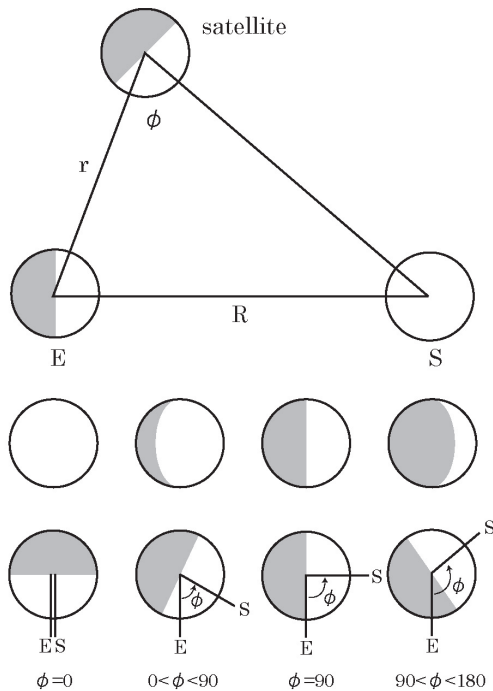


図1 人工衛星 (satellite) と地球 (E)、太陽 (S) の位置関係と位相角 ( $\phi$ )。中段は観測者から見た光る部分の変化。

角が $0\sim 90^\circ$ の場合と $90\sim 180^\circ$ の場合に分けて考えて説明する。 $0\sim 90^\circ$ の場合、図1のように光る部分を、中心を通る線で分けて考えるとわかりやすい。片側は半円全体が光っている。もう片方の光っている部分は楕円の半分の形である。この楕円の面積は、円全体の面積を $S$ とおくと、位相角が $0\sim 90^\circ$ のときは $S \cos \phi$ 、位相角が $90\sim 180^\circ$ のときは $-S \cos \phi$ となる。この楕円の半分を半楕円と呼ぶと、半円と半楕円を足し合わせた面積を、円全体の面積で割ったものが求める位相関数である。すなわち、位相関数を $F(\phi)$ とおくと以下のような式となる。

$$F(\phi) = \frac{1}{S} \left( \frac{1}{2}S + \frac{1}{2}S \cos \phi \right) = \frac{1}{2}(1 + \cos \phi)$$

また、 $90\sim 180^\circ$ の場合は、図1のように片側の半円は全体が光らない。もう片方では光っていない部分は半楕円となる。つまり、光っている部分は半円から光っていない半楕円を引いた部分である。つまり、位相関数 $F(\phi)$ は以下のような式となる。

$$\begin{aligned} F(\phi) &= \frac{1}{S} \left( \frac{1}{2}S - \frac{1}{2}(-S \cos \phi) \right) \\ &= \frac{1}{2}(1 + \cos \phi) \end{aligned}$$

結果的にどちらの場合も位相関数は、

$$F(\phi) = \frac{1}{2}(1 + \cos \phi) \quad \dots \text{式①}$$

の式で表される。

## 2.3 人工衛星の明るさと等級

地上で観測される人工衛星の明るさを $L$ とおき、単位距離から観察される太陽の明るさを $L_s$ とおく。地球から太陽までの距離を $R$ 、観測者から人工衛星までの距離を $r$ とおくと、 $R \gg r$ であるので、人工衛星を経由した太陽までの距離は $R$ で近似できる。人工衛星の実際の大きさを $B$ (人工衛星の半径を $b$ とおくと、 $B=2\pi b$ )、反射率を $A$ 、位相関数を $F(\phi)$ とおくと、

$$L = \frac{1}{R^2} \times \frac{B}{r^2} \times A \times F(\phi) \times L_s$$

となる。ここで、 $R$ 、 $A$ 、 $B$ 、 $L_s$ は定数なのでまとめると、

$$L = \frac{ABLs}{R^2} \frac{F(\phi)}{r^2} \quad \dots \text{式②}$$

となる。

さて、天体の明るさを観測するとき、観測された明るさを表すのに等級 (Mag.) という単位が使われている。等級では、数値が大きいほど暗く、逆に小さいほど明るくなる。また、等級は1等級小さくなると約2.512倍明るくなる。ポグソンは明るさが  $L_1$  で等級が  $m_1$  の天体と明るさが  $L_2$  で等級が  $m_2$  の天体について以下の式が成り立つことを示した。

$$m_2 - m_1 = -2.5 \log_{10} \left( \frac{L_2}{L_1} \right)$$

この式をポグソンの式という。明るさ  $L$  の人工衛星の等級を  $M$  とすると、ポグソンの式より、 $M$  は定数  $C$  を使って以下のように書ける。

$$M = -2.5 \log_{10} L + C$$

この式の  $L$  に式②を代入する。すると、

$$M = -2.5 \log_{10} \left( \frac{ABLs}{R^2} \frac{F(\phi)}{r^2} \right) + C$$

ここで、 $R$ 、 $A$ 、 $B$ 、 $L_s$  は定数なので外に出して、新たな定数  $C'$  を用いると、

$$M = -2.5 \log_{10} \left( \frac{F(\phi)}{r^2} \right) - 2.5 \log_{10} \left( \frac{ABLs}{R^2} \right) + C$$

$$M = -2.5 \log_{10} \left( \frac{F(\phi)}{r^2} \right) + C' \quad \dots \text{式③}$$

という式に変形できる。

## 2.4 人工衛星の等級による光度予測

上述の式③をみると、人工衛星の等級は観測者から人工衛星までの距離  $r$  と位相角  $\phi$  の関数であることがわかる。そして位相関数  $F(\phi)$  は式①によってわかっているので、あとは定数  $C'$  を決めるだけである。定数  $C'$  が決まれば、人工衛星までの距離  $r$  と位相角  $\phi$  を式③に代入することによって、そのときの人工衛星の等級  $M$  が求まる。これが、この研究で使用する人工衛星の光度予測の原理である。

ここで、式③の定数  $C'$  を決める必要がある。これは観測によって求めることができる。人工衛星までの距離  $r$  と位相角  $\phi$  がわかっていると

きの人工衛星の等級を観測から求める。このとき、 $-\log_{10} \left( \frac{F(\phi)}{r^2} \right)$  を X 軸、観測された人工衛星の明るさ  $M$  を Y 軸にとってデータをプロットすると、式③からデータは傾きが2.5の直線に乗るはずである。つまり、このデータについて、傾き2.5の最小二乗直線を求めれば、式③の定数  $C'$  を求めることができる。いったん定数  $C'$  が決まれば、上述したように、予測したい時刻の人工衛星までの距離  $r$  と位相角  $\phi$  を式③に代入することによって、人工衛星の明るさを予測することができる。なお、定数  $C'$  には人工衛星の大きさや反射率といった人工衛星ごとに異なる要素が含まれているため、人工衛星ごとに定数  $C'$  は異なる値をとる。

さて、「人工衛星観測ナビゲータ」では、人工衛星の飛行経路と到来時刻に加えて、人工衛星までの距離  $r$  と位相角  $\phi$  のデータを提供している。これを使用して観測時刻の人工衛星までの距離  $r$  と位相角  $\phi$  のデータを得ることができる。

## 3. 人工衛星の光度観測の手順

### 3.1 観測の準備

さて、人工衛星の観測には、人工衛星の軌道情報が必要である。そこでまず、「人工衛星観測ナビゲータ」で観測したい人工衛星の飛行経路、到来時刻を確認する。「人工衛星観測ナビゲータ」の使い方は後述する。次に、観測したい人工衛星の飛行経路上で、明るさを比較できそうな観測ポイントを決める。このとき、天体観測に慣れていない観測者は、できるだけ明るい星の周辺を観測ポイントに選ぶとよいだろう。観測ポイントが決まれば、その場所での目印となる星をいくつか決め、その星を明るさの基準星とする。そして、人工衛星の明るさとの比較のため、あらかじめ明るさの基準星の等級を確認しておく。なお等級の確認には、天文年鑑や天文シュミレーションソフト「ステラナビゲータ Ver.7」を用いた。

### 3.2 観測及び等級判断

人工衛星が多く到来する日没後や夜明け前の

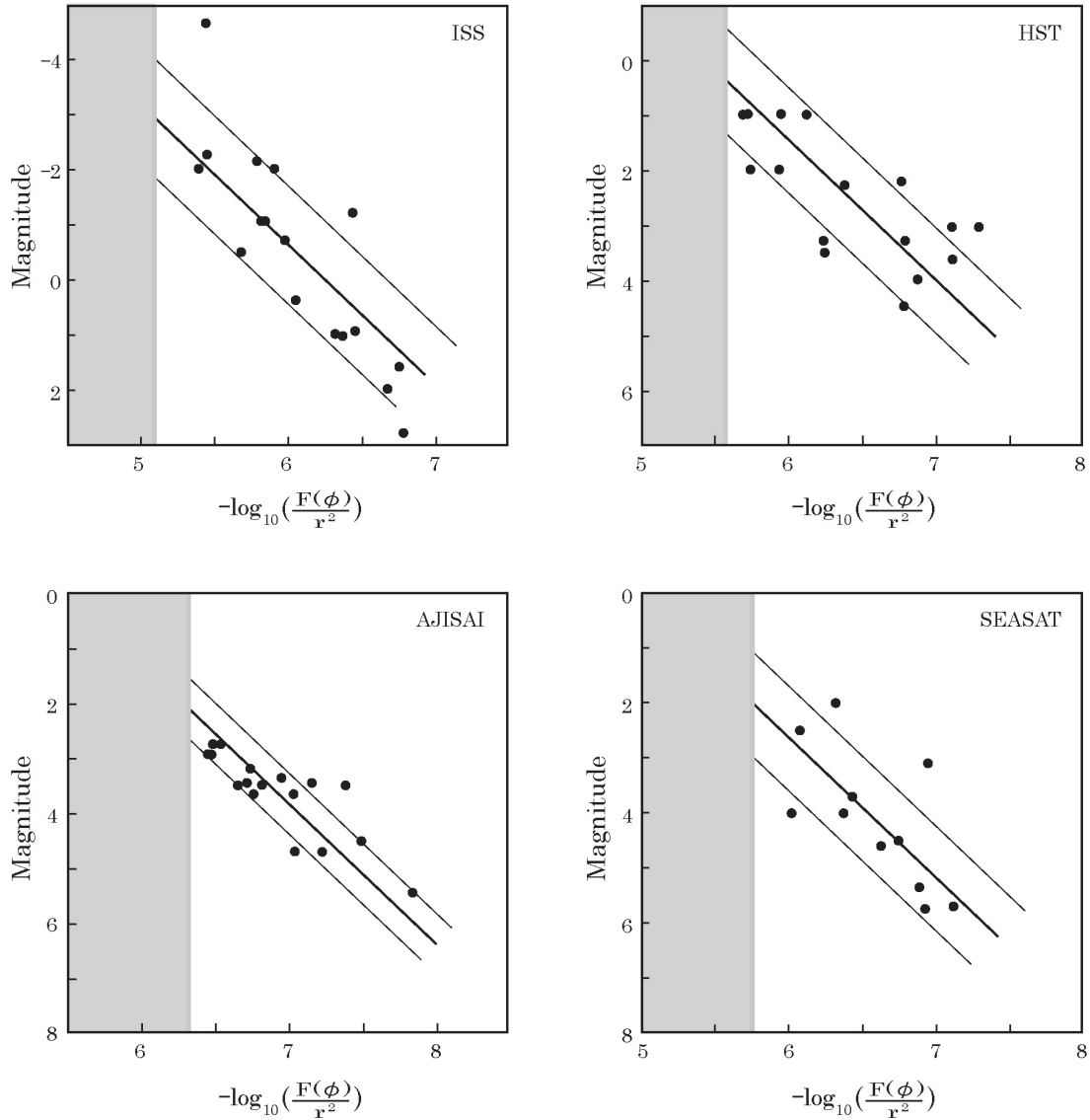


図2 観測データと光度予測直線

薄明時には（人工衛星は地球に非常に近いので夜中は上空に来て地球の影に入っているため光らない）、目印となる星が見つけない可能性があるため人工衛星の観測では、到来時刻の前に双眼鏡で観測ポイント及び目印となる星を確認する必要がある。確認が済んだら観測ポイントを見ながら到来時刻まで待機する。到来時刻に人工衛星の通過が確認できたら、基準星と明るさを比較する。このとき等級の違う2つの星の明るさで挟んで中央値をとることで、人工衛星の等級を判断する。（例、2等星より暗く、3等星より明るい場合は中央値をとって2.5等級）。

余裕があれば人工衛星を追跡し、複数の観測ポイントで明るさを比較、判断する。人工衛星

は刻々と観測者までの距離や位相角を変えながら移動するので、観測中に明るさは変化する。また、大気の減光効果によって高度が低くなると同じ恒星でも明るさが暗く見える（大気分子による光の散乱で減光するので、高度が低いと光路に含まれる分子の量が増えより減光する）。そこで人工衛星と明るさを比較する星は見かけ上十分近いものを選ぶことが好ましい。そうすれば、恒星も人工衛星もほぼ同じ大気の減光効果を受けるので、明るさの比較において大気の減光効果は無視できる。

### 3.3 「人工衛星観測ナビゲータ」の利用方法

岐阜大学地学科のホームページでは、「人工衛

星観測ナビゲータ」として、人工衛星の飛行経路と到来時刻などの人工衛星を観測するための情報を提供している。また光度予測をするために必要な人工衛星までの距離  $r$  や位相角  $\phi$  のデータも「人工衛星観測ナビゲータ」から入手することができる。

「人工衛星観測ナビゲータ」上では手順1から手順4までの画面がある。まず手順1の画面では、観測する場所の緯度経度と観測する日時を入力し、検索をクリックする。つぎに手順2の画面では、その場所で、その時刻から48時間以内に観測することができる人工衛星の情報が示される。そして、示された人工衛星のリストから観測したい人工衛星を選び、その人工衛星の最大高度の時刻をクリックすると、手順3の画面になり、人工衛星の飛行経路とその経路上に示された到来時刻が確認できる。この画面で飛行経路をクリックすると、手順4の画面になり、方位や高度が確認できる。また、倍率（視野の広さ）などを変えることもできる。手順3の画面の右上にある位相角の文字をクリックすると、手順3の画面と同じような画面になる。ここで飛行経路をクリックすると、別ウィンドウで位相角や観測者から人工衛星までの距離などの情報を確認できる。

このように「人工衛星観測ナビゲータ」は人工衛星の飛行経路、到来時刻、方位や高度、位相角や観測者から人工衛星までの距離などさまざまな軌道情報を提供している。この研究では、「人工衛星観測ナビゲータ」を使用して光度予測に必要な人工衛星までの距離  $r$  と位相角  $\phi$  を求めた。

## 4. 結果

### 4.1 観測対象となる人工衛星

人工衛星の明るさの観測によって、等級のデータが必要なことがわかった。上述した式③の定数  $C'$  は人工衛星ごとに異なるため、明るさを予測する人工衛星を決め、その人工衛星についての観測データを集めなければならない。観測は、「人工衛星観測ナビゲータ」に掲載されているすべての人工衛星について行う必要があるが、

ここでは観測機会の多かった人工衛星の明るさについて結果を示す。

また、上述した等級の予測方法では、観測データについて最小二乗法で直線を求めることによって定数  $C'$  を決定するので、データの数が少ないと信頼性が低い。今回は観測対象とする人工衛星ごとに10点程度のデータを目標として観測をし、観測データから定数  $C'$  を求め、各人工衛星の光度予測の式を決定した。

観測者から人工衛星までの距離は人工衛星の飛行高度よりも小さくなることはない。そこで、位相関数を1とし人工衛星の飛行高度を  $r_m$  とすると、その人工衛星がとる最小の  $-\log_{10}\left(\frac{F(\phi)}{r^2}\right)$  の値が決まる。このときの  $-\log_{10}\left(\frac{1}{r_m^2}\right)$  をここでは、軌道要素の最小値と呼ぶことにする。この軌道要素の最小値のときの光度が予想される最も明るいときの人工衛星の光度となる。

今回、国際宇宙ステーション (ISS)、ハubble宇宙望遠鏡 (HST)、測地実験衛星あじさい (AJISAI)、海洋観測衛星 (SEASAT) の4つの人工衛星についての観測データをまとめ、光度予測の式を求めた (図2)。光度 (Mag.) は小さい値の方が明るいいため、縦軸は逆にとっている。図2では横軸に  $-\log_{10}\left(\frac{F(\phi)}{r^2}\right)$  の値をとっているが、軌道要素の最小値よりも小さくなることはないので各人工衛星についてこの値よりも小さい部分は灰色で示した。

グラフ中の太線は最小二乗直線、細線は最小二乗直線±平均誤差である。この最小二乗直線が予想光度直線で、距離  $r$  と位相角  $\phi$  のデータから横軸の  $-\log_{10}\left(\frac{F(\phi)}{r^2}\right)$  が決まると、そのときの光度 (Mag.) が予測できる。

### 4.2 国際宇宙ステーション (ISS)

2005年10月30日～11月21日にかけての観測データ15点と2003年5月3日、2004年10月1日の観測データを合わせた合計17点のデータを使用した。

これらの観測データから求めた定数  $C'$  は-

15.6になり、直線の式は $Y=2.5X-15.6$ となった。また、平均誤差は1.1等級であった。飛行高度は350kmで軌道要素の最小値は5.1となった。このときの予想光度は-2.9等級となり非常に明るい光度が期待できる人工衛星である。

#### 4.3 ハッブル宇宙望遠鏡 (HST)

2005年10月13日～20日にかけての観測データ10点に2003年4月16日～18日の観測データ6点を合わせた合計16点のデータを使用した。

これらの観測データからもとめた定数 $C'$ は-13.5になり、直線の式は $Y=2.5X-13.5$ となった。また、平均誤差は1.0等級であった。飛行高度600kmで軌道要素の最小値は5.6となった。このときの予想光度は0.5等級となった。

#### 4.4 測地実験衛星あじさい (AJISAI)

2005年10月24日～11月17日にかけての観測データ17点を使用した。

これらの観測データから求めた定数 $C'$ は-13.7になり、直線の式は $Y=2.5X-13.7$ となった。また、平均誤差は0.6等級であった。飛行高度1500kmで軌道要素の最小値は6.4になった。このとき予想光度は2.3等級となった。条件が悪いと肉眼で観察するのは難しい光度といえる。

#### 4.5 海洋観測衛星 (SEASAT)

2005年11月20日～23日にかけての観測データ7点に2003年4月16日～5月9日の観測データ4点を合わせた合計11点を使用した。

これらの観測データから求めた定数 $C'$ は-12.4になり、直線の式は $Y=2.5X-12.4$ となった。また、平均誤差は0.9等級であった。飛行高度760kmで軌道要素の最小値は5.8となった。このとき予想光度は2.1等級となった。条件が悪いと肉眼で観察するのは難しい光度といえる。

### 5. 考察

人工衛星の光度予測のために、人工衛星を均質で理想的な球体と考えて人工衛星の等級を決定する式を導いた。これは式③に示したように人工衛星までの距離 $r$ と位相角 $\phi$ の関数となる。

この式は予測したい人工衛星ごとに定数 $C'$ を決定することによって完成するが、この研究では、定数 $C'$ は観測によって決定することにした。観測ではなく実際の太陽の光度や人工衛星の反射率、大きさなどの物理量を決めて定数 $C'$ を求めることもできるが、あまり現実的ではない。

人工衛星は理想的な球体と考えて式を求めているため、大きさなどは実際の形状からどのような近似をするかによって値が変わってくる。この研究の方法は、そういった要素を合わせた定数 $C'$ をどの値と考えると最もよく近似できるか観測によって求める方法である。もし、その人工衛星の形状などが理想的でなければ、求めた定数 $C'$ で予想される光度の値と観測データとのずれは大きくなるはずであり、観測データからその人工衛星を理想的な球体と仮定することが妥当であるかの評価もできる。この研究では、国際宇宙ステーション (ISS)、ハッブル宇宙望遠鏡 (HST)、測地実験衛星あじさい (AJISAI)、海洋観測衛星 (SEASAT) の4つの人工衛星について光度の観測をした。各人工衛星の観測データは、図2のように概ね傾き2.5の直線に乗っている。この観測データから求めた光度の予想直線と観測データとのずれをあらわす平均誤差は $\pm 1$ 等級程度に収まっている。このことから、少なくともこの4つの人工衛星については、理想的な球体と仮定して求めた式でも十分実用的な予測ができることがわかった。

観測をおこなった4つの人工衛星のうち、あじさい (AJISAI) は平均誤差が $\pm 0.5$ 等級と他の3つに比べて精度が良かった。この原因について、現在の段階では人工衛星の形状が影響したのではないかと考えている。ISSやHST、SEASATがどちらかというと細長い形状をしているのに対し、あじさい (AJISAI) はレーザー反射板を球面に貼り付けた独特の形状をしている。細長い形状だと人工衛星の姿勢によって観測者に対する見かけの大きさは変化する。しかし、球状であれば姿勢による変化はない。そのため、あじさい (AJISAI) は他の3つの人工衛星よりも精度良く光度が決まった可能性がある。

今回観測した人工衛星のなかで、ハッブル宇

宙望遠鏡 (HST) については、光度が急激に大きくなるフレア現象が見られた。フレア現象はイリジウム衛星で顕著に現れることが知られているもので、広い平面をもつ人工衛星の機体の表面が鏡のように太陽光を反射して観測者に届く現象である。フレア現象については人工衛星の姿勢の情報があれば考慮してより精度の高い予測ができるものと考えられる。

## 6. 結論

人工衛星の光度予測のために、人工衛星を均質で理想的な球体と考えて人工衛星の等級を決定する式③を導いた。この式③の定数  $C'$  を決定するために、国際宇宙ステーション (ISS)、ハッブル宇宙望遠鏡 (HST)、測地実験衛星あじさい (AJISAI)、海洋観測衛星 (SEASAT) の4つの人工衛星について光度の観測をした。この観測データから最小二乗法によってそれぞれの光度予測の式 (等級  $M$  について) を以下のよう

$$\text{ISS} : M = -2.5 \log_{10} \left( \frac{F(\phi)}{r^2} \right) - 15.6$$

$$\text{HST} : M = -2.5 \log_{10} \left( \frac{F(\phi)}{r^2} \right) - 13.5$$

$$\text{AJISAI} : M = -2.5 \log_{10} \left( \frac{F(\phi)}{r^2} \right) - 13.7$$

$$\text{SEASAT} : M = -2.5 \log_{10} \left( \frac{F(\phi)}{r^2} \right) - 12.4$$

この光度予想直線と観測データとのずれをあらわす平均誤差は大きいものでも  $\pm 1$  等級程度であり、おおよその目安としては十分な精度の予測といえる。

## 謝辞

本研究には、文部科学省基盤研究 (C) : ISS を活用した新世紀型科学教育を実現する「地球観測ナビゲータ」の開発 (研究代表者川上紳一, 課題番号16500583) の研究費の一部を使用した。ここに記して感謝いたします。

## 引用文献

- 荒木俊馬・荒木雄家 (1956) 現代天文学事典 第X章 惑星の運動と光度, 86-94.
- 川上紳一 (2003) 星座の中を移動する人工衛星を見つけよう!, 科学, **73**, 931-933.
- 川上紳一・三谷弘敏・長谷川司 (2003a) 明るい人工衛星を観測しよう, 楽しい理科授業, **35**, No.444 (2003年8月号), 52-53.
- 川上紳一・三谷弘敏・長谷川司・上田康信 (2003b) 人工衛星の観測を取り入れた星座学習へ向けて—人工衛星の軌道予報局の開設と明るさの観測—, 科学教育学会研究会研究報告, **17**, No.6, 7-10.
- 東條文治・川上紳一 (2006) 「地学実験及びコンピュータ処理」におけるカリキュラムの改善, 岐阜大学教育学部研究報告 (自然科学), **30**, 51-56.
- Veverka, J. (1977) Photometry of satellite surfaces, In *Planetary satellites*, Ed. J. A. Burns, The University of Arizona Press, 171-209.